

М. А. Зорина*, С. И. Степанов, М. С. Карабаналов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

**m.a.zorina@urfu.ru*

Научные руководители – проф., д-р техн. наук *М. Л. Лобанов*,
проф., д-р техн. наук *Ю. Н. Логинов*

ВЗАИМОСВЯЗЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕКСТУРЫ ВОЛОЧЕНИЯ В ГЦК-МЕТАЛЛАХ

На примере электротехнической чистой меди показано, что текстура волочения ГЦК-металлов представляет собой набор нескольких предпочтительных ориентаций, подобно текстуре прокатки. В периферийной области проволоки формируется текстура, близкая к текстуре сдвига, которая повернута относительно текстуры центральной области на угол несколько меньший, чем 90° . Распределение основных ориентаций по сечению деформированной проволоки связано с напряженно-деформированным состоянием, возникающим при волочении.

Ключевые слова: волочение, ГЦК, медная проволока, текстура, напряженно-деформированное состояние.

M. A. Zorina, S. I. Stepanov, M. S. Karabanalov

THE DEFORMATION AND RECRYSTALLIZATION TEXTURE OF THE FCC METALS

In the case of electrolytic tough pitch copper wire, the drawing texture of FCC metals has been shown to consist of several preferred orientations, similar to the rolling texture. Texture similar to the shear one was formed in the periphery region, although it was rotated to the texture of central region at an angle slightly smaller than 90° . The distribution of the main preferred orientations along the cross section of deformed wire was explained with the stress-state occurring upon drawing in the central and periphery regions.

Keywords: drawing, FCC metal, copper wire, texture, strain-stress state.

Волочение – основная технологическая операция при производстве огромного числа металлических материалов и изделий из Cu, Ag, Au и Al. В процессе производства эти материалы проходят сильные деформационные воздействия (прокатка, волочение), следствием чего является появление выраженной кристаллографической текстуры. Важный вывод из существующих моделей формирования текстуры при деформации – возникновение при относительно больших степенях деформации стабильных ориентировок [1]. На характер распределения

деформаций при волочении влияют граничные условия процесса: напряжения противонапряжения, напряжения трения, конфигурация инструмента (полуугол конусности волокна) и т. д. [2, 3, 4]. Текстура, формирующаяся при волочении, является сложной аксиальной. Особенность текстуры волочения материалов с ГЦК-решеткой: она состоит из двух основных аксиальных компонент: $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$. Отмечают, что при волочении наблюдают компоненту $\langle 112 \rangle$, которая считается метастабильной. Т. к. угол отклонения между компонентами $\langle 111 \rangle$ и $\langle 112 \rangle$ всего 19° , то нередко при расчетах компоненту $\langle 112 \rangle$ относят к $\langle 111 \rangle$. Появление компоненты $\langle 112 \rangle$ в периферийной области проволоки связывают с действием в этой области трех систем деформации: растяжения, сжатия и сдвига, в отличие от центральной области, где действуют только две системы – сжатия и растяжения [5]. Неравномерное распределение сдвиговых напряжений по сечению проволоки приводит к неоднородному распределению компонентов аксиальной текстуры по радиусу протянутой проволоки.

Цель данной работы – исследование текстурного состояния волочения ГЦК-металла на примере медной проволоки и установление соответствия между распределением основных текстурных компонент и напряженно-деформированным состоянием по радиусу проволоки.

Материал для исследования – полуфабрикаты из меди марки М001. Проволока диаметром 1,65 мм получена на стане многократного волочения за 10 проходов. На стадии холодной деформации суммарный коэффициент вытяжки составил 23,51, накопленное относительное обжатие 95,7 %.

Текстурный анализ проводили методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ/EBSD) на двухлучевом электронно-ионном микроскопе (системе) ZEISS CrossBeam AURIGA. Анализ проводили по всему радиусу проволоки. В данной работе было принято, что оси текстур соответствуют направлениям параллельным оси деформации (AD), а плоскость текстуры условно соответствует кристаллографическим плоскостям, параллельным направлению нормали (ND) в проволоке в данном локальном месте съемки. Для моделирования напряженно-деформированного состояния при волочении решена краевая задача в системе расчета ABAQUS.

Результаты численного моделирования приведены в виде распределения нормальных напряжений (рис. 1). В очаге деформации в центральной области проволоки реализуются максимальные растягивающие напряжения (S_+), параллельные оси волочения. В периферийной области реализуются максимальные сжимающие напряжения (S_-), перпендикулярные образующей конуса волокна (рис. 1, б). Максимальное касательное напряжение (τ_{\max}), действующее в точке, определяется как векторная разность S_- и S_+ нормальных напряжений, действующих в этой точке. Вектор τ_{\max} будет меняться по сечению проволоки в ходе процесса волочения. В работе приведен результат,

достигаемый при однократном волочении. При следующих проходах соотношение между S_+ и S_- будет меняться незначительно, т. к. схема напряженно-деформированного состояния остается прежней при некотором варьировании режимов обжатий.

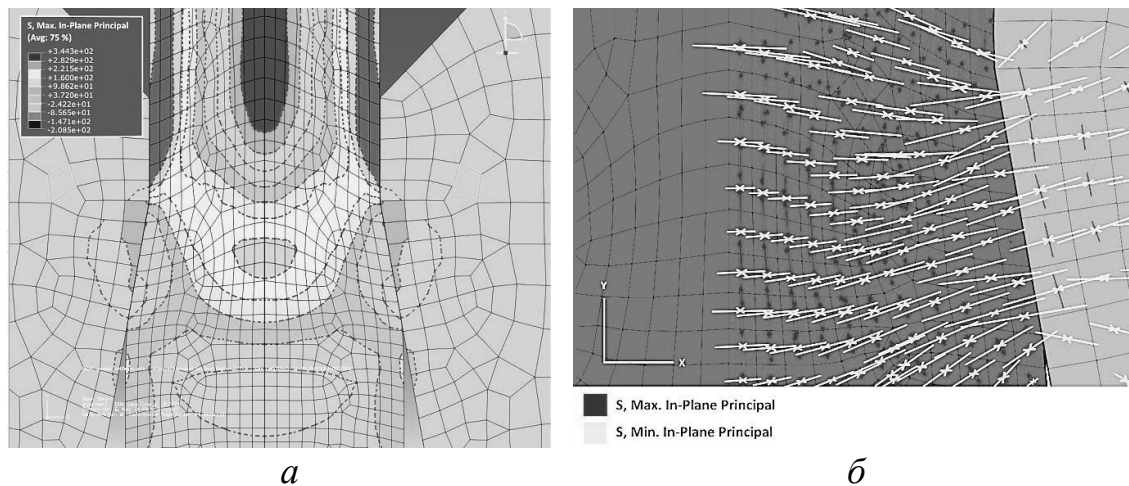


Рис. 1. Результаты численного моделирования: распределение нормальных напряжений по сечению проволоки в ходе волочения (а); распределение векторов нормальных напряжений в очаге деформации (б)

В результате проведения текстурного анализа установлено, что текстура материала после 10 проходов волочения в пределах всего изделия сложная аксиальная, что определяется симметрией деформации. Ранее в работах [3, 6] показано, что в медной проволоке присутствует неоднородность распределения основных текстурных компонент по радиусу. Центральная область проволоки характеризуется двумя главными компонентами: волокно $\langle 100 \rangle$ и волокно $\langle 111 \rangle$. На периферии основную объемную долю составляют зерна с ориентациями в диапазоне $\langle 114 \rangle \dots \langle 112 \rangle$.

При анализе текстуры на локальном уровне ее можно описывать как сложную текстуру, состоящую из множества ограниченных компонент. Например, на ППФ $\{100\}$ в виде отдельных рефлексов видно равномерное распределение полюсов аксиальных компонент $\langle 001 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ (рис. 2, а, б) в центральной области проволоки. В свою очередь, на интегральной ППФ $\{100\}$ (рис. 2, в) видны отдельные рефлексy. Таким образом, суммарные аксиальные текстурные составляющие в пределах всего изделия в целом могут быть описаны как сложные текстуры, состоящие из ограниченных компонент. По аналогии с центральными областями проволоки текстуру периферийного слоя также следует рассматривать как сложную текстуру, состоящую из ограниченных компонент (рис. 3). В работе [1] теоретически спрогнозированы и экспериментально подтверждены текстуры прокатки и сдвига для ГЦК- и ОЦК- металлов. Показано, что текстуры прокатки и сдвига сформированы из стабильных компонент. Причем данные компоненты

являются повернутыми друг относительно друга на 90° вокруг оси, параллельной поперечному направлению. Полученный результат объяснен симметрией напряженных состояний.

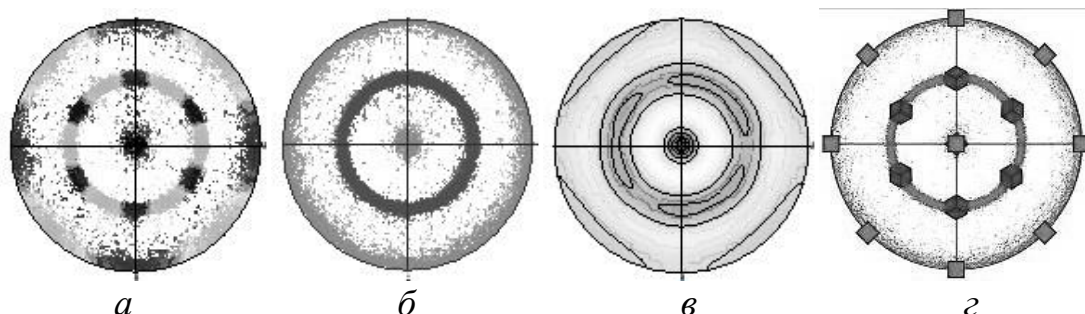


Рис. 2. ППФ $\{100\}$ с центральной области медной проволоки: в виде отдельных полюсов с направлений ND (а) и AD (б), интегральная ППФ (в), модельная (г)

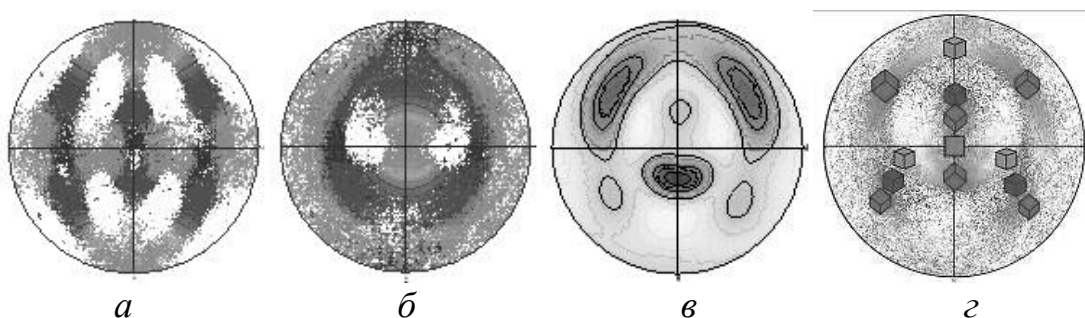


Рис. 3. ППФ $\{100\}$ с периферийной области медной проволоки: в виде отдельных полюсов с направлений ND (а) и AD (б), интегральная ППФ (в), модельная (г)

Основные текстурные ориентации

Центральная область			Периферийная область		
Обозначение	$\{hkl\}\langle uvw \rangle$	Символ	Обозначение	$\{hkl\}\langle uvw \rangle$	Символ
C_1	$(1-10)[001]$		S_1	$(-611)[133]$	
C_2	$(0-10)[001]$		S_2	$(0-10)[001]$	
C_3	$(-211)[111]$		S_3	$(33-2)[113]$	
C_4	$(12-1)[-111]$		S_4	$(-3-32)[113]$	
			S_5	$(-211)[111]$	

В соответствии с напряженным состоянием, реализующимся при волочении, в центральной области проволоки должны формироваться стабильные ориентировки, соответствующие текстуре прокатки. В соответствии с расчетами напряженно-деформированного состояния в периферийной области должны формироваться ориентировки, повернутые относительно центральных вокруг оси нормальной к AD на угол $90-\beta^\circ$,

где β -угол близкий к величине полуугла конусности волокна. То есть должна формироваться текстура, близкая к текстуре сдвига. Это в действительности наблюдается в проведенном эксперименте (см. табл.). Подобное изменение напряженно-деформированного состояния и соответствующий разворот текстуры наблюдали в работах [7, 8].

Текстуру проволоки после волочения можно рассматривать как текстуру, состоящую из дискретных компонент, соответствующих стабильным ориентировкам, формирующихся при напряженном состоянии, соответствующему волочению.

В центральной области проволоки формируются волокна: $\langle 111 \rangle$ (на локальном уровне $\{112\}\langle 111 \rangle$) и $\langle 100 \rangle$ (на локальном уровне $\{110\}\langle 001 \rangle$ и $\{100\}\langle 001 \rangle$).

В периферийной области на локальном уровне формируется текстура, близкая к текстуре сдвига, которая повернута относительно текстуры центральной области на угол несколько меньший, чем 90° .

Факторами, оказывающими влияние на текстуру волочения, являются факторы, ответственные за направление максимальных действующих касательных напряжений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-32-00030-мол_а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Hölscher M., Raabe D., Lücke K. Relationship between rolling textures and shear textures in f.c.c. and b.c.c. metals Acla metalii mater. 1994. V. 42. № 3. P. 879–886.
2. The effects of die angle on texture and annealing response of ETP copper wire / F. F. Kraft, U. Chakkingal, G. Baker, R. N. Wright // JMPT. 1996. V. 60, N. 15. P. 171–178.
3. Effect of the Strain Rate on the Properties of Electrical Copper / Yu. N. Loginov, S. L. Demakov, A. G. Illarionov, [et. al.] // Russian Metallurgy (Metally). V. 2011. N. 3. P. 194–201.
4. Bhattacharyya A., Rittel D., Ravichandran G. Effect of strain rate on deformation texture in OFHC copper Scripta Materialia. 2005. V. 52. P. 657–661.
5. EBSD Analysis of the Submicron Width Fibber Shaped Grain Copper Fabricated by Drawing / M. Matsushita, T. Kuji, H. Kuroda [et. al.] // MSA. 2011. V. 2. P. 911–916.
6. Влияние температуры отжига на текстуру в медной проволоке / С. Л. Демаков, Ю. Н. Логинов, А. Г. Илларионов [и др.] // ФММ. 2012. Т. 113. С. 720.
7. Interrelation of Crystallographic Orientations of Grains in Aluminum Alloy AMg6 Under Hot Deformation and Recrystallization / G.M. Rusakov,

A.G. Illarionov, Y.N. Loginov, [et. al.] // Met. Sci. Heat Treat. 2015. V. 56. P. 650–655.

8. Взаимосвязь ориентировок деформации и рекристаллизации при горячей прокатке электротехнической анизотропной стали / М. Л. Лобанов, А. А. Редикульцев, Г. М. Русаков [и др.] // МиТОМ. 2015. № 8. С. 44–49.